



国防特色学术专著·核科学与技术

核能经济学

HENENG JINGJIXUE

任德曦 肖东生◎著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社



国防特色学术专著·核科学与技术

核能经济学

任德曦 肖东生 著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书以核能、核能体系与核能经济作为总论,阐明了世界能源、中国能源的发展与核电的发展战略;分6章阐述了核电、反应堆、推进动力产业、核燃料产业,放射同位素与辐射产业,包括天然铀、转化、浓缩、元件、后处理与核燃料循环;用3章分析了核能(电)布局与选址、核环境、核安全与辐射防护、核废物与核设施退役;最后,以核电成本与价格专论结束。其中,建立核电标杆电价建议,被国家发改委作为政策采纳。

本书是原国防科工委立项的专著兼教材,可作为核能(电)经济、管理、技术、工程工作者的工作参考书、培训教材;也可作为高校核能(电)经济管理、核工程技术相关的本科生、研究生教材;还可作为核工业经济、核项目经济、核技术经济、同位素与辐射经济、核医学、核农学的专题教材。

图书在版编目(CIP)数据

核能经济学/任德曦,肖东升著. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2014.8

ISBN 978-7-5661-0861-6

I. ①核… II. ①任… ②肖… III. ①核能工业-能
源经济学 IV. ①F407.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第199141号

核能经济学

任德曦 肖东生 著
责任编辑 张盈盈

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街124号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://www.hrbeupress.com> E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

哈尔滨市石桥印务有限公司印刷 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:40.25 字数:1015千字

2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5661-0861-6 定价:82.00元

《核能经济学》编委会

参加著作者:任德曦 肖东生 任 伟 李民权 王世鑫
池雪峰 戴忠信 任 戈 李鹏程 李 峻
胡 泊

审稿人:伍志明 曹鼎阶 曹扬达 梁卓干 胡 泊

统编、修改、审定:任德曦

序 言

我国第一部《核能经济学》出版了,这是一部经原国防科工委“十一五”规划立项出版的专著。

核能经济是知识经济、创新经济、新能源、新技术的综合经济,是核能(电)项目经济、核能产业经济、核技术经济的基础与本源学科。本书涉及了核能经济体系、内涵、经济发展方向,对建立安全、高效核能产业经济,提高核能在诸多能源中的地位、作用、竞争性具有重要意义,对能源可持续发展、人类生态、环境可持续发展具有战略意义。

《核能经济学》是南华大学经济管理学院任德曦教授主编的第四部核能经济与管理著作,也是集中了中核集团公司、中广核集团公司及相关企业诸位专家智慧的成果。初览该著作有如下特点、优点、创新之处值得提出。

1. 科学总结、高度概括了核能历史定位。人类开辟了一个新的能源时代——核能开发、使用时代;发现了一个资源丰富、前途广阔、规模宏大的能源宝库;找到了一个清洁、高效、不排放、少排放温室气体及二氧化硫、氮氧化物的替代能源;开发了一个多功能、广用途的新技术、新产品、新产业;发展了一个高科技、有前途但又具有风险的产业。

2. 论述了世界能源发展对人类可持续发展的意义,阐明了发展核能的必要性。在分析化石能源的资源、生产、消费的贡献及不可再生后,探讨了可再生能源发展潜力与不足,剖析了核能的投入、成长、成熟期及核事故波折,最后展望了世界未来低碳能源格局,未来能源发展将以清洁、安全能源为主体的多种能源共存的格局。

3. 全面分析了中国能源发展的巨大成就与发展导向,阐明了中国核电发展战略。著作详尽论述了中国发展核电的必然性、布局、发展战略与规划、发展方针、发展目标与发展阶段。

4. 科学地划分出了核能十大技术经济体系,并对编织系统图作了全面论证。十大核能系统包括:核科学、技术与发展系统;核资源、地质勘测开发系统;核燃料系统;反应堆系统;核电站系统;核武器系统;放射性同位素与辐射技术应用系统;核专用设备、仪器、装置、装备制造系统;核安全、核环保与辐射防护系统;核能经济与管理系统。

5. 阐明了核安全、核环保是高于一切、重于一切的核能(电)生命线。本书用专门章节论述了核安全是核能生命线的意义,列出了中国核安全规划内容,并在核能各系统中渗透安全、环保理念与举措;将安全置于核事业、产业、技术、经济、产品之上;置核安全、核环保于法律、法规、制度、组织之中,重于一切;在规划、设计、建造、制造、运行、退役、废物处置等方面落实核安全、核环保,敦促国家、地区、核企业、群体、个体视核安全为核能生命线。

6. 探讨了核能经济分析与评价的方法,从宏观与微观、产业与产品、技术与经济、成本与价格等方面剖析了核能的经济性。核能的综合经济主要从能源战略需求、能源安全、经济安全、能源替代与节约、能源结构改善、循环经济与综合利用、各能源比较等方面进行评价。核燃料、核电站、辐射产业经济评价各有侧重与特点。核燃料经济评价主要从净能分析的能比高;温室气体减排、清洁,核燃料循环利用与增殖;燃料价格稳定、高效能、低成本;核能企业布局不受资源与运力所制约;社会效益好等方面进行评价。

7. 分析反应堆类型、功能,研究核电发展技术路线与核电站分代,从而剖析、评价核电与核电站的经济性。反应堆与核能(电)装置是核能产业的核心,是将核能转变(换)电能、热能、推进动力的装置。首先,分析、比较各类热中子堆的优缺点与经济性,分析某些堆型的发展,比如压水堆占到世界运行堆的60%以上,有的反应堆在萎缩、淘汰;再与核电技术路线的热中子堆、快中子堆、聚变堆的发展及现行的二代、三代、四代堆的演进作技术经济对比、评价。著作最后用两节阐述了核动力舰船、空间核能源与核动力装置,如核潜艇、核巡洋舰、核航空母舰、原子破冰船等。这是一个庞大的推进动力群体,它用的反应堆数比核电站使用的反应堆数还多,研究核能技术经济应将其包括在内。由于其敏感、保密性,资料不齐全且不一定非常准确,著作也做了试探阐述。

8. 科学分析、有创见地阐述了应用最广泛的辐射技术产业。第一次从技术经济角度探讨了放射性同位素与辐射技术在工业、农业、医学、社会、国防、科研中广泛应用;第一次提出了核医学、核农学、社会应用的人本经济理念,拓展核能在人类可持续发展中的作用。辐射技术是除信息技术外,人类应用最广泛、最深入的技术经济产业。

9. 提出以核科学、核技术研究、开发为先导,自主建设我国完整的核能体系,自主建设安全、高效核电(站)产业。中国是一个人口大国,必须建设一个核能大国、核电强国,必须以科学技术研究开发为先导,通过“自主设计、自主制造、自主建造、自主运行”来建设这个体系,必须建立自主核能(电)装备制造体系,才能挺起中国核能(电)产业的脊梁。

综上所述,《核能经济学》作者精心策划、潜心著述。书中阐述了能源革命对人类进步的巨大意义,能源危机带来的损害;论述了核能的兴起与“原子能时代”的必然性;憧憬、展望了未来的能源发展将是一个清洁、低碳、安全、高效、多种能源共存的世界,包括化石能源、可再生能源的水能、风能、太阳能、生物质能和丰富的核能。著作既论述了核能经济的基本概念、基本内容、基本方法,还采用了不少新成就、新技术、新方法,又提出了许多新观点、新理念、新内容,如核能经济的新概念、评价方法、核能的人本经济理念、核能体系的划分与构成、核电的定价机制等。著作具有前瞻性、先进性、系统性、综合性、创见性的特点,是一部有总结、有创新、有建树的著作。

中国核能行业协会理事长

张华祝

2012年9月

前 言

核能的开发与应用,是世界能源领域的一次革命,是20世纪最伟大的发明创造,具有划时代意义,20世纪一度被誉为“原子能时代”。核能应用,首先是令世界震惊的核武器,然后是核电、推进核动力、辐射技术应用。核发电仅用20多年时间就占据了世界发电量的16%;核推进动力舰船,功率大、航速高、续航力强,后勤依赖小,所用反应堆数已超过现运行核电站所用堆数;核技术与辐射产业、产品广泛应用于工业、农业、科研、国防、社会、医学,是仅次于信息技术应用最广泛、最深入的产业;核燃料为核能应用提供了高效、清洁、安全、经济的能源。

福岛核事故发生后,除日本、德国等少数国家外,其他国家核电计划未发生减退,核能未来的开发应用,仍具有广阔的前景,特别是在发展中国家。

核能技术与核能经济管理是核能产业发展前进的两个轮子,缺一不可。关于核技术的著述由于其技术的敏感性,其数量远少于其他技术与产业的著作,而核能经济与管理著作在20世纪几乎是空白,本著作具有开创性、探索性。南华大学的前中南工学院在20世纪80年代就开始了这一探索。

原中南工学院管理系在核工业部教育司及学院的领导支持下,20世纪80年代初开始了核能经济与管理学科的建设。首先,按照我国第一个核电站秦山30万千瓦机组原型,按1:40建立了教学、研究模型;20世纪80年代中期建立了国内第一个人-机(因)工程研究实验室。核工业部教育司1985年组织管理教学与实验考察团赴国外考察,引进了人-机实验室设备,后建立了人因研究所,开展了教学、研究、实验。其次,开展核能经济与管理学术研究,在国际、国内发表核能经济与管理论文100多篇,出版了《核能经济与管理发展探索》文集与专著,获得了省部级科技进步等奖项十多次。再次,组织核工业部专家编写教材,十多位专家、教授、院士编著、审核出版了《核工业经济导论》,获全国核类优秀教材奖,以后又出版了专著《核电站项目管理》,获社科成果奖。最后,开设核能经济与管理课程。从20世纪80年代开始就以核工业经济讲义对工学院管理系学生授课,两本教材依次出版后,就正式列入了《核能经济》与《核电站项目管理》课程教学计划,并对核技术学院开设了《核电站经济分析》,对全校开设了《核工业概论》文化素质课,选修学生每期百人至数百人,上述核经济管理课程受教育学生数千人。该学科建设30年,任德曦教授自始至终在策划、研究、著述、授课、领导。上述三部著作是其专著或主编,并得到工学院、南华大学领导、经济管理学院几任院长的支持,邓志良、朱开悉、肖东生、周晓东院长、领导、参与和支持上述研究、著述、教学活动,使经济管理学院专业的核特色建设在全国取得领先地位。

在核能经济管理研究方面,以张力教授为首,在核人因工程、核安全文化方面取得了突出的研究成果,获得了多次科技进步等奖项。南华大学建立后,以校党委书记邹树梁教授为首,建立了南华大学核能经济与管理研究中心,将核能经济管理研究工作推入新阶段,走上了新的研究之路,与核能产业、企业结合更紧密,取得了更多研究成果。

《核能经济学》是南华大学经济管理学院第五部核类著作,是国内第一部《核能经济学》,是国防科学技术委员会立项的专著。全书由任德曦、肖东生策划、专著、审定。任伟承担了全书统编、修改,并承担两章内容的写作,为课程制作了PPT。参加著作的有肖东生(第

7、8章)、任伟(2、4章)、李民权(12、13章)、胡泊(第3章)、任戈(第2章)、李鹏程(第8章)、李峻(第9章)、池雪峰(第10章)、戴忠信(第11章)、王世鑫(第14章)、任德曦(1、2、3、4、5、6、7、8章);参加本书审稿的有曹鼎阶(9章)、伍志明(11章)、曹扬达、梁卓干(第6章)、胡泊(1、2、4、5章);参与统编的有王超老师、任伟博士;本书最终由任德曦经两年修改、统编、审定完成。

本书的成功首先感谢原国防科工委为专著立项;感谢中国核能行业协会理事长张华祝为其作序,对著作做了高度评价;感谢中核集团公司核燃料部、财务部、宜宾核燃料元件厂、秦山核电基地及一、二、三期核电公司,连云港核电公司、三门核电公司;感谢广东核电集团公司、大亚湾、岭澳一期、二期核电厂。各公司领导热情接待,协助我们调研,提供文献、资料,派专家参与写作。感谢南华大学校领导的支持与帮助;感谢南华大学教务处、科研处、社科处、财务处、经济管理学院、校老科协,在著作立项、调研、参加学术会议等多方面关照、帮助。

本书引用了众多著作、刊物的成果,除在文献索引部分注明外,对未引注者表示歉意,对您的支持表示感谢。

本书是一部涉及技术、经济前沿且敏感的学科,资料有滞后性、探讨性及预测性,另由于编著者的技术、经济理论水平有限,全书肯定有许多不足、甚至错误,敬请批评指正,不胜感谢。

作 者

2013年7月

目 录

第1章 核能、核能体系与核能经济	1
1.1 核能	1
1.2 核能的开发——核武器试制	8
1.3 核能产业体系的特征	16
1.4 核能体系组成	18
1.5 核能经济性的评价与历史地位	31
1.6 核能经济学研究的对象与内容	37
第2章 世界能源的发展与核能兴起	42
2.1 能源对人类发展的作用	42
2.2 能源的类型与资源	49
2.3 世界能源发展	57
2.4 世界能源消费与贸易	68
2.5 电力的生产与消费	79
2.6 世界能源发展趋势与预测	86
2.7 世界可再生能源发展	97
2.8 世界核能的崛起	106
2.9 低碳发展时代的世界能源格局	112
第3章 中国能源发展与核电战略	118
3.1 中国能源的发展	118
3.2 中国能源资源	126
3.3 中国能源发展中存在的问题	131
3.4 我国能源发展战略	135
3.5 中国能源战略目标	140
3.6 中国能源战略对策	148
3.7 我国能源需求的预测	155
3.8 中国核电的发展	159
3.9 中国核电的发展战略	167
第4章 核电与核推进动力产业	178
4.1 核电是能源、电力的支柱产业	178
4.2 核反应堆、核电站与动力堆产业组成	186
4.3 先进核电站的开发与研究	201
4.4 核电站经济分析与评价	225

4.5	提高核电经济性的途径	239
4.6	核动力舰船	251
4.7	空间核能源与核动力装置	271
4.8	核能供热与海水淡化	273
第5章	核燃料产业	280
5.1	核燃料的组成	280
5.2	核燃料资源	282
5.3	核燃料的特点	288
5.4	核燃料产业与市场	288
5.5	核燃料的技术经济评价	294
5.6	核燃料循环生成	307
5.7	降低核燃料总成本途径	309
第6章	放射性同位素与辐射技术应用	317
6.1	放射性同位素与辐射技术产业	317
6.2	放射性同位素与辐射技术应用内容与机理	320
6.3	放射性同位素技术的效益、效用评价	328
6.4	放射性同位素来源与产品	332
6.5	放射性同位素示踪技术应用	340
6.6	放射性同位素技术的工业应用	345
6.7	核农学及辐射技术在农业中的应用	356
6.8	核医学及核技术在医学中的应用	362
6.9	辐射技术在社会与环境中的应用	391
6.10	放射性同位素能源	393
第7章	核能产业布局与厂址选择	398
7.1	核能产业布局	398
7.2	世界核电站内陆、沿海分布	407
7.3	中国核电布局的发展	411
7.4	核能厂址选择	415
第8章	核安全与核环境	424
8.1	世界核安全与环境保护在提高、加强	424
8.2	核安全是核能的生命线	427
8.3	核安全原则	430
8.4	核安全防御与安全评价	436
8.5	核事故与核应急	442
8.6	核环境安全与评价	455

第9章 天然铀经济	463
9.1 铀矿资源及其评价	463
9.2 铀矿开采	476
9.3 天然铀生产	487
9.4 提高天然铀经济效益的途径	498
第10章 铀浓缩经济	507
10.1 浓缩铀生产的基本原理与工艺流程	507
10.2 世界铀浓缩工业概况	513
10.3 离心法铀浓缩工厂的生产成本分析	517
第11章 核燃料元件经济	519
11.1 核燃料元件概述	519
11.2 各类反应堆核燃料元件经济概述	525
11.3 世界核燃料元件市场与我国核燃料元件厂建设	533
11.4 我国核燃料元件工业的建设与发展	535
11.5 压水堆燃料组件制造费用与经济性分析	541
11.6 提高压水堆燃料元件经济性的途径	554
第12章 核燃料循环与乏燃料后处理	563
12.1 核燃料循环概述	563
12.2 核燃料循环的经济评价	569
12.3 乏燃料后处理厂投资经济	580
第13章 核废物处理与核设施退役	584
13.1 核废物来源与分类	584
13.2 放射性废物处理、处置及费用	592
13.3 核设施退役	599
13.4 核废物处置场(库)投资分析	603
第14章 核电成本与价格	606
14.1 核电成本	606
14.2 核电定价机制回顾	615
14.3 经营期核电电价定价方法	619
14.4 核电运行财务模型	622
14.5 适应核电发展的新价格机制	625
参考文献	630

第 1 章 核能、核能体系与核能经济

随着时代的发展人类社会经历或将经历四个能源时期:柴薪时期;煤炭时期;石油、天然气时期;清洁、低碳多元能源结构时期。预计在 2050 年前后,世界将形成化石能源、核能源与可再生能源并重的低碳型多元能源结构。在第四期中最突出的能源就是核能,只用 20 多年的发展就取代了世界能源总量的 7.0%,电力的 17%。20 世纪 50 至 70 年代,曾经被誉为原子能时代。预测在 21 世纪核能在能源中地位将上升,服务于科研、工业、农业、医学、航天、海洋、社会、国防等各领域,在国民经济各领域核能应用将更加广泛,作用将更大,影响将更为深远。

1.1 核 能

核能(Nuclear Energy)是指原子核中的核子重新分配时释放出的能量,其能量机理为核结合能或核力。核能分为两类,一类称为裂变能,一类称为聚变能。裂变能是以重原子核裂变所产生的能量,聚变能是以轻原子核聚变所产生的能量。

1.1.1 原子与原子核

原子(Atomic)由原子核和围绕原子核运动的电子构成。电子是带单位负电荷 e 的微粒。电子电荷的数值为 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ 库[仑](为电荷单位,单位符号为 C,1 库[仑] = 1 安[培]·秒)。

原子核(Atomic Nucleus)带正电荷,其数值是 e 的整数倍。围绕原子核运动的电子数等于原子核的正电荷,所以整体看来原子是电中性的。

原子核处在原子中心部位,由质子和中子组成。质子带正电荷 $+e$,中子为电中性粒子,不带电,质子数 Z 与它的外围电子数相等。原子在与外界场或粒子的相互作用下,可能丢失部分或全部外围电子。电子不足的原子称为离子,显然离子带正电。原子也可吸附电子,形成负离子。

任何原子核都用两个数来表征:核子数(又称质量数) A 与质子数(又称电荷数) Z ,中子数 N 可从 A 和 Z 推算出: $N = A - Z$ 。 Z 相同的原子称为元素,它们在元素周期表中占同一位置,化学性质基本相同, Z 也称原子序数。具有一定的原子序数 Z 和质量数 A 的某种原子,又称为核素。具有相同的质子数 Z 和不同的中子数 N 的原子称为同位素。如果元素符号用 X 表示(X 可以是氧、碳、氢、氮等),那么任何原子核都可用符号 ${}_Z^AX_N$ 表示,例如 ${}_2^4\text{He}_2$ 、 ${}_7^{14}\text{N}_7$ 、 ${}_8^{16}\text{O}_8$ 等。由于元素符号包含了质子数(或电荷数) Z ,而中子数可以从核子数 A 与质子数 Z 之差求出,因此,原子核符号写成 AX 即可。

1.1.2 结合能与核力

结合能(Binding Energy)指把一个粒子从一个粒子系统分出来或将一个系统分解为它的组分粒子所需要的能量。结合能常用于原子核中的亚原子粒子、受到原子核束缚的电子及晶体中结合在一起的原子和离子。对原子核来说,它的结合能就是把原子核完全分解成自由质子和中子所需的能量。原子的结合能分为化学结合能与原子核结合能。

化学结合能是化学反应释放出的能量。源于将原子保持在分子中的力,这种力仅同原子外围电子结构相关。当两个原子组合成分子时,各原子的电子云会发生变形,把合拢在一块的所有原子核笼罩在内。由于化合物的分子的能量总是低于它所包含的各原子能量之和,所以这些外围电子重新组合的过程会释放出能量来,称为化学结合能。

化学反应中原子之间的电子交换获得的能量很小,例如煤或石油燃烧释放的能量,每个碳或氢原子与氧结合成二氧化碳或水的过程,只能释放出几个或十几个 eV 能量。碳原子燃烧的化学反应为 $C + O_2 \longrightarrow CO_2 + 4.1\text{ eV}$ 。

原子核的结合能(Nucler Binding Energy)就是把原子核完全分解为自由质子和中子所需的能量。这个能量也是这些自由的质子和中子组成原子核时所释放出的能量。不同核素的结合能差别很大,一般来说,核子数 A 大的原子核结合能也大。原子核的结合能除以质量数 A 就是每个核子的平均结合能,称为比结合能。氘、氚、锂-6、铀-235、铀-238 核素的质量和结合能见表 1.1。

表 1.1 氘、氚、锂-6、铀-235、铀-238 核素的质量和结合能

名称	符号	质量(u)	结合能(MeV)	平均结合能(MeV/核子)
氘	${}^2_1\text{H};\text{D}$	2.014 102	2.2	1.1
氚	${}^3_1\text{H};\text{T}$	3.016 050	8.5	2.8
锂-6	${}^6_3\text{Li}$	6.015 124	32.0	5.3
铀-235	${}^{235}_{92}\text{U}$	235.043 943	1 783.9	7.59
铀-238	${}^{238}_{92}\text{U}$	238.050 819	1 180.1	7.57

核力(Nuclear Force)是核子间的强相互作用力。核子是中子与质子的统称,它能克服质子间的库仑斥力,将原子核中的核子维系在一起。原子核质量、结合能等的性质以及核衰变、核反应等现象与核力相关。核力是一种短程力(力程约为 $2 \times 10^{-15}\text{ m}$);核力具有饱和性;核力近似地具有与电荷无关的性质;核力与作用核子的自由旋相对取向及总自旋与轨道角动量的耦合相关。至今,人们对核力的认识还不完善。

原子核能源于将核子保持在原子核中的作用力,即核力。把各核子凝聚在一起,克服质子之间静电斥力。当质子与中子组合成原子核时,像化学反应一样,也会释放出能量。核力比原子核外围电子的相互作用力强大得多,核反应中释放的能量,就参与反应的同等质量的物质而言,要比化学反应中释放的化学能大几百万倍。例如,1 kg 煤燃烧释放的能量约为 8 kW·h,而 1 kg 铀-235 裂变释放能量达到 19 500 000 kW·h,铀-235 裂变能是煤化学能的 244 万倍。

我们所以有可能利用核能,就是因为一些原子核结合得比其他原子核更紧密些。原子核的紧密程度,用结合能除以核子数 A 得出的核子平均结合能来表示。如图 1.1 所示,中等质量的原子核结合得最紧,平均结合能最大,较重的和较轻的原子核的平均结合能都略为减小。如果一个重核,例如质量数为 235 的铀原子核分裂为两部分,那么生成的两个较轻核的结合能之和就会大于原来铀核的结合能。将前、后平均结合能之差乘以两个较轻的核子总数,即得出

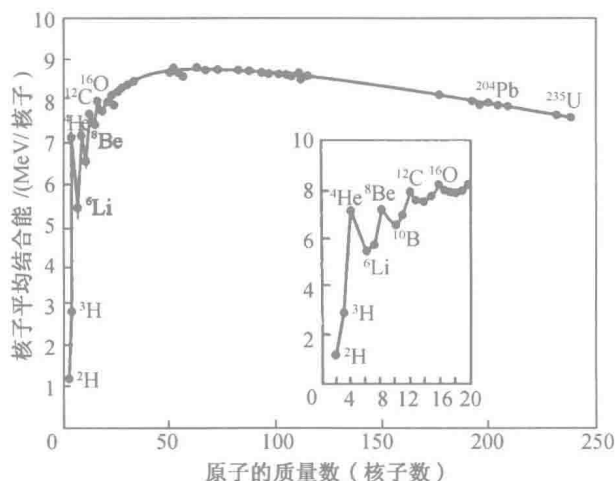


图 1.1 核子平均结合能

裂变过程释放的能量。另一方面,两个轻核合成一个较重核的聚合过程,由于核子在这个较重核中,因此结合得更紧了,也会释放出能量来。例如图 1.1 中的小图所示,氘核、氚核和氦-4 核的平均结合能分别约为 1.1 MeV、2.8 MeV 和 7.1 MeV,由氘核与氚核合成为一个氦-4 核的聚变过程,将释放出 $4 \times 7.1 - (2 \times 1.1 + 3 \times 2.8) = 17.8$ MeV 的能量。因此,有两种释放原子能的方法——核裂变与核聚变。

重核的裂变一般要靠中子来激发。也就是说,当吸收一个中子所获得的结合能连同该中子的动能足以打破原来的核内平衡时,重核才会分裂。在这里,各种核素的情况有所不同:铀-235 核(其质子数 Z 为偶数,中子数 N 为奇数)吸收动能不大的慢中子便很容易分裂;而对于 Z 和 N 均为偶数的铀-238 核,仅当中子的能量大于一定的阈值时,才能引起核裂变,这是因为铀-238 核裂变所需能量超过了一个中子的结合能,须靠中子动能来补足。

1.1.3 裂变能与聚变能

1. 裂变能

裂变能(Fission Energy)是通过原子核裂变反应所获得的能量。核裂变是一个重原子核分裂成两个以上质量为同一量级的原子核(裂变碎片)的现象。原子核每次裂变释放的总能量,通常指其平均值,可从核的质量亏损算出。

核裂变可分为自发裂变和诱发裂变两种类型。自发裂变类似于核衰变,铀和超铀元素都具有自发衰变现象;诱发衰变为核反应的一种类型。中子诱发裂变为最重要的一种诱发裂变。在中子轰击下,其原子核被激发,先变成哑铃状,最后变成质量大体相当的两个较轻的原子核,同时放出巨大能量、2~3 个新中子和 α 、 β 、 γ 射线。铀-235 在慢中子诱发裂变释放总能量为 195~200 MeV,包括碎片总动能 168 MeV,裂变中子动能 5 MeV,裂变产物放出的缓发 γ 射线与瞬发 γ 射线均为 7 MeV,裂变产物放出的缓发 β 粒子 8 MeV,可利用能量约 195 MeV,还有不可利用中微子能量 12 MeV。

天然铀在中子轰击下易发生裂变的主要成分是铀-235,但它只占天然铀的 0.71%,天

然铀的 99.27% 是铀-238, 不易分裂, 却能俘获中子, 造成中子损失, 不利于链式反应维持。解决办法是使裂变产生的快中子(中子能量大于 0.1 MeV)慢化, 变成能量为 0.025 MeV、速度为 2 200 m/s 的慢中子; 另外就是把铀-235 富集。这样引起铀-235 核裂变概率大大超过铀-238 俘获概率, 链式反应可持续, 才能产生实用意义的裂变能。这种自持进行的连续核裂变反应称为“链式”核裂变反应。像铀-235、钚-239、铀-233 这样能够被不同能量的中子所裂变并能发生链式反应的核素, 称为“易裂变核素”。

2. 聚变能

聚变能(Fusion Energy)是由轻原子核熔合成较重的原子核反应所产生的能量。一般来说, 结合能较小的轻原子核的聚变反应结合成较大的原子核, 由于质量亏损将释放出大量的能量, 如氘和氚聚变反应产生中子和氦-4 并释放出 $Q = 17.588$ MeV 的能量。核聚变反应必须在几千万摄氏度以上的高温 and 一定等离子体密度条件下方能实现。由于两个轻核都带正电荷, 互相排斥, 如果有足够能量使它们靠得很近, 以致于短程核力超过库伦排斥力, 方可实现聚变反应, 造成自持的聚变反应, 释放聚变能。当核能来自高温状态下的热运动时, 聚变反应又称热核反应。如太阳和宇宙中的恒星能长时间发光发热, 其巨大能源是氢、氦等的热核反应。

由于原子之间静电斥力同它们所带的电荷乘积成正比, 所以原子核的原子序数越小, 聚合所需动能(温度)越小。一些最轻的原子核如氢、氘、氚、锂最容易用来释放聚变能。

3. 核裂变与核聚变的比较

(1) 核裂变与核聚变的区别。

核裂变(Nuclear Fission)是由重原子核自发地或由于吸收一个中子而分裂为两个或两个以上更轻的原子核, 以及产生或释放 2 至 3 个自由中子、放出巨大能量的过程。核聚变(Nuclear Fusion)将两个较轻原子核(氘和氚)聚变成一个较重原子核, 从而释放出巨大的能量和射线的过程。

核裂变是在常温下进行的, 引起裂变反应的关键是中子, 核反应后中子延迟几秒钟才发射出来, 人们足以利用这段时间控制反应速度。核聚变反应的基本条件是超高温, 要使聚变反应能以显著速率进行, 必须要使反应燃料达到 1 亿℃ 高温, 比太阳内部的 1 500 万℃ 高一个量级。在高温下, 燃料已成为完全电离的稀薄气体——等离子体(物质第四态)。

核聚变发生时对燃料必须进行约束。在 1 亿℃ 高温时, 等离子体中的核(或电子)以每秒几千英里的平均速度在各方向无规则运行, 在百万之一秒内所有粒子都碰到容器壁, 结果它们的动能基本损失了。这样不能维持足够长的时间, 保持等离子密度, 发生有效数量的聚变反应。因此必须想办法阻止等离子粒碰撞器壁, 即约束等离子体。凭借约束高温等离子体, 而实现受控的核聚变, 基本途径可分为磁约束和惯性约束两类。

要达到自持聚变反应, 必须创造反应所需等离子密度、温度和能量约束时间等条件, 即所谓的“聚变三乘积”(劳逊判据 Lawson)的能量得失相当要求为

$$n\tau T \geq 2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$$

式中 n ——等离子体密度, m^{-3} ;

τ ——等离子体能量约束时间, s;

T ——等离子体温度, keV。

对于氘氚(D-T)反应,从能量考虑,等离子密度为 $10^3 \text{ m}^{-3} < n < 10^{21} \text{ m}^{-3}$;得失相当温度 $T = 10 \text{ keV}$;要求约束时间 $0.1 \sim 1.0 \text{ s}$;约束等离子磁场强度 $B \geq 7$ 高斯。这就是氘-氚聚变的“科学可行性”,受控聚变 D-T、D-D 的参数要求见表 1.2。

表 1.2 受控聚变 D-T、D-D 的参数要求

D-T	D-D	参数要求
$10^{20} \text{ m}^{-3} \leq n \leq 10^{21} \text{ m}^{-3}$	$10^{20} \text{ m}^{-3} \leq n \leq 10^{21} \text{ m}^{-3}$	获得适当的功率密度
$n\tau \geq 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ $T > 10 \text{ keV}$	$n\tau \geq 10^{22} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ $T > 100 \text{ keV}$	达到能量得失平衡
$B \geq 7$ 万高斯	$Q \geq 22$ 万高斯	获得足够长的约束时间

聚变能量得失相当,聚变反应而且能自持下去,称为热核反应的“点火”。点火应变与聚变反应的类型和等离子特性有关。D-T 聚变的点火温度为 1 亿℃;D-D 聚变的点火温度为 5 亿℃。

(2) 聚变能的优势。

聚变能与裂变能相比,其优点是:

①资源丰富。聚变能比裂变能丰富。海水中所含的氘可供人类百亿年能源之需。1 L(升)海水所含的氘可释放的 7 500 MJ 聚变能,相当 230 L 汽油或 250 kg 煤。据测算每升海水中含有 0.03 g 氘,地球上海水中含有 45 万亿 t 氘,是取之不竭的能源。

②释放能量大。氘氚反应释放的能量,就同等的质量来说,约为铀核裂变反应的 4 倍。一座 100 万 kW 聚变核电站,每年耗氘量 304 kg,可裂变堆需耗天然铀 180 t,燃煤火电站需耗煤 300 万 t。

③核聚变燃料比裂变燃料成本低。铀-235 在天然铀中只占 0.71%,提炼十分复杂,1 kg 3.2% 丰度的铀-235 燃料组件约为 1 800 美元,而 1 kg 氘仅需 300 美元。

④安全性能好。不会发生裂变反应堆超临界或燃料熔化事故,也没有裂变产物污染环境。受控核聚变反应可在稀薄的气体中持续地稳定运行,是安全的。核聚变需极高温度,如某环节出现问题,燃料温度下降,核聚变会自动停止,没有失控危险。

⑤放射性废物量大大减少。聚变能除氘有放射性外(半衰期为 12.26a),没有长寿命放射性核素,较易处置。

⑥热效率高。聚变技术突破后,热效率高达 90%。可能实现将等离子带电粒子中的能量直接转变为动力,热效率高达 90%,使热污染问题大为减轻。

可控聚变能商用可能是 50 年以后的事。除海水氘资源可用百亿年外,月球上有丰富的氦-3,是核聚变的好材料。月球诞生有 40 亿年,约有百万吨氦-3,其能量相当地球上有史以来开发矿物燃料的 10 倍。

1.1.4 核能的发现

核能经历发现、发明、创造、前进等几个阶段。核能从发现到发明、创造经历了约 50 年。目前人类正在研究开发第四代反应堆,进一步探索、发明、创造聚变能的可控利用。

1. 放射性发现

1896 年法国的贝可勒尔(H. Becquerel)发现了放射性。他发现某些物质能自发地放射出某种看不见的射线,后来证明,射线是从原子核中释放出的带电粒子或粒子流。贝可勒尔发现铀线——天然放射性,人们把这一重大发现作为原子核物理的开端。发现放射性同 1895 年发现的 X 射线、1897 年发现的电子一起被称为 19 世纪末三大发现。三大发现改变了人们关于物质和物质特性的传统观念,从而揭开了 20 世纪物理学革命的序幕。

2. 发现放射性元素

1898 年法国约里奥·居里夫妇发现了钋和镭等放射性元素。居里夫妇在研究铀盐射线过程中,不仅“定性”地解释了物质的放射性,而且“定量”地测定了物质的放射性活度。并从铀盐物质和钍的化合物物质共同性质中归纳出了“放射性元素”和“放射性现象”概念,创立了一门新兴学科——放射学。还从镭的氯化物和溴化物等化合物每时每刻都产生氦原子现象中归纳出了一个新概念——“原子蜕变”。

3. α 、 β 、 γ 射线命名

1899 年,卢瑟福(E. Rutherford)研究了铀和钍发出的各种射线,并命名了其中的两种:一种是很容易被吸收的射线称之为 α 射线;另一种是穿透能力强一些的称之为 β 射线。后来法国科学家 P. V. 维拉德发现了穿透力更强的第三种射线,被命名为 γ 射线,如图 1.2 所示。

图 1.2 中可见 α 、 β 、 γ 三种射线在磁场中偏转情况。 α 射线带正电荷, β 射线带负电荷,两者偏转方向相反; γ 射线不带电荷,因此不偏转。

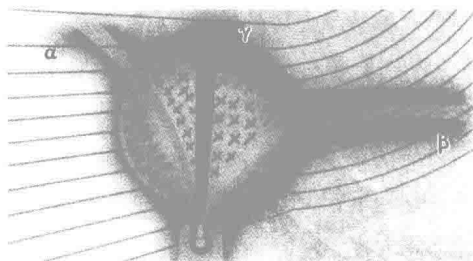


图 1.2 α 、 β 、 γ 射线的发现

4. 量子理论假设

1900 年,马克斯·普朗克提出了量子理论假设:辐射(这里指某种给定颜色的光线)放出和吸收的能量不能以无限小的量进行。按照这种假设,频率为 ν 的电磁辐射的最小能单元为 $\varepsilon = h\nu$, ε 称做能量子或量子,比例常数 h 称为普朗克常量。普朗克的这一发现奠定了量子理论基础。1905 年,爱因斯坦假定:光不是一个连续性的波动,而是像普朗克所说的辐射束那样的能束。这个假定进一步充实了量子理论。1913 年尼斯·玻尔将量子理论应用到原子核周围的运动上。他发现一个电子的能量也是定量的,因为它吸收了能量(在这里指光能),就跳到了一条更高的轨道,如果它放出能量(譬如放出的能量同刚才吸收的能量相等),就跳回到原来轨道。当今,量子力学几乎成为所有科学里的基础科学。原子能、微电子、激光、化工、仪表,以至空间和宇宙科学都离不开量子力学。

5. 质量转化能量

1906 年,爱因斯坦提出了著名的质能关系式 $E = mc^2$ 。 E 、 m 和 c 分别代表能量、质量和